



سازمان حفاظت محیط زیست



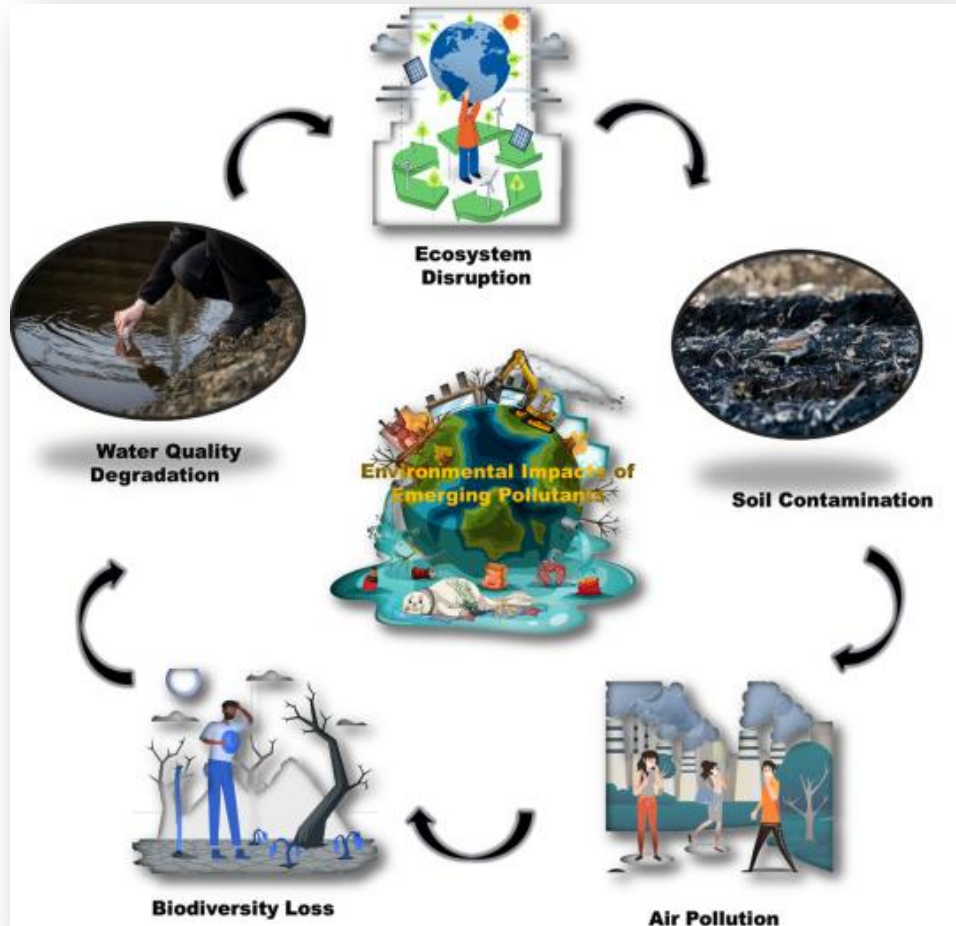
آلاینده‌های خاک در مناطق بمباران شده: چالش‌ها و راهکارهای اصلاح (remediation)

محسن شهریاری مقدم
مدیر کل دفتر حفاظت و مدیریت زیست محیطی آب و خاک

بهار ۱۴۰۵



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

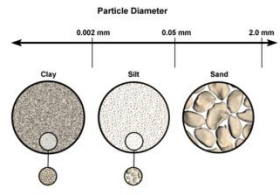


| منبع اصلی | آلاینده های اصلی | دسته بندی |
|--------------------------------------|---|---------------------------------------|
| بدنه، کلاهک جنگی | Pb, Ni, Cr, Cd, Cu, Zn, Hg, Al, W, Sb | فلزات سنگین |
| سوخت جامد | پرکلرات | آلاینده های شیمیایی، آلی و اکسیدان ها |
| سوخت مایع | هیدرازین و مشتقات آن کروسین | |
| کلاهک جنگی | ترکیبات نیتروآروماتیک و نیتروآمین (TNT, RDX, HMX و محصولات حاصل از تجزیه آنها) | |
| کلاهک های جنگی خاص | اورانیوم ضعیف شده و اکسیدهای آن | آلاینده های رادیواکتیو |
| تخریب ثانویه ساختمان ها و زیرساخت ها | آزبست، پلاستیک سوخته... | سایر آلاینده ها |

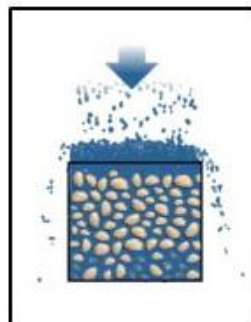
| آلاینده ها | محیط اصلی تجمع | پایداری نسبی در محیط زیست | تحرك در محیط | سمیت محصولات تجزیه نسبت به ماده اصلی | سمیت و سرطان زایی |
|---------------------------------------|---|---------------------------|--------------------------------------|--|------------------------|
| Pb, Ni, Cr, Cd, Cu, Zn, Hg, Al, W, Sb | خاک و آب | بسیار پایدار | چسبندگی بالا به خاک، تحرك کم | کروم و جیوه سمی تر | بالا، برخی سرطان زا |
| ClO ₄ ⁻ | آب زیرزمینی | ماه ها تا سال ها | تحرك بسیار بالا، جذب ناچیز به خاک | معمولاً سمیت کمتر | اختلال در تیروئید |
| هیدرازین | خاک و آب | ساعت ها تا روز ها | تحرك بالا، محلول در آب | برخی محصولات (نیتروزامین ها) سمی تر | سمی، احتمال سرطان زایی |
| گرو سین | خاک، آب | هفته ها تا ماه ها | چسبندگی متوسط تا بالا | PAHs (پایدار تر و سمی تر) | برخی ترکیبات سرطان زا |
| TNT | خاک و آب | هفته ها تا ماه ها | تحرك نسبتاً زیاد چسبندگی کم | برخی متابولیت ها سمی تر | سمی، احتمال سرطان زایی |
| RDX | خاک و آب | هفته ها تا ماه ها | تحرك نسبتاً کم چسبندگی متوسط | معمولاً کمتر یا مشابه سمی | سمی، احتمال سرطان زایی |
| HMX | خاک و آب | ماه ها تا سال ها | تحرك کم چسبندگی متوسط تا بالا | محصولات معمولاً کمتر سمی | سمی |
| اورانیوم ضعیف شده و اکسیدهای آن | خاک (پتانسیل نفوذ به آب های زیرزمینی) | بسیار پایدار | متوسط تا بالا | برخی موارد ممکن است خطرناک تر باشند | سمیت شیمیایی |



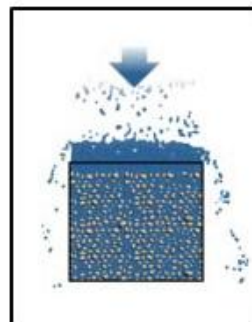
| | |
|--------------|---|
| غلظت آلاینده | کم / متوسط / زیاد / بحرانی |
| نوع آلاینده | فلزات سنگین، آلی، اکسیدان، رادیواکتیو، سایر |
| بافت خاک | شنی / لومی / رسی.... |
| نفوذپذیری | زیاد / متوسط / کم |
| رطوبت | خشک / مرطوب / اشباع |
| بارش سالانه | کم / متوسط / زیاد |
| دما | سرد / معتدل / گرم |
| باد غالب | کم / متوسط / شدید |



Sand

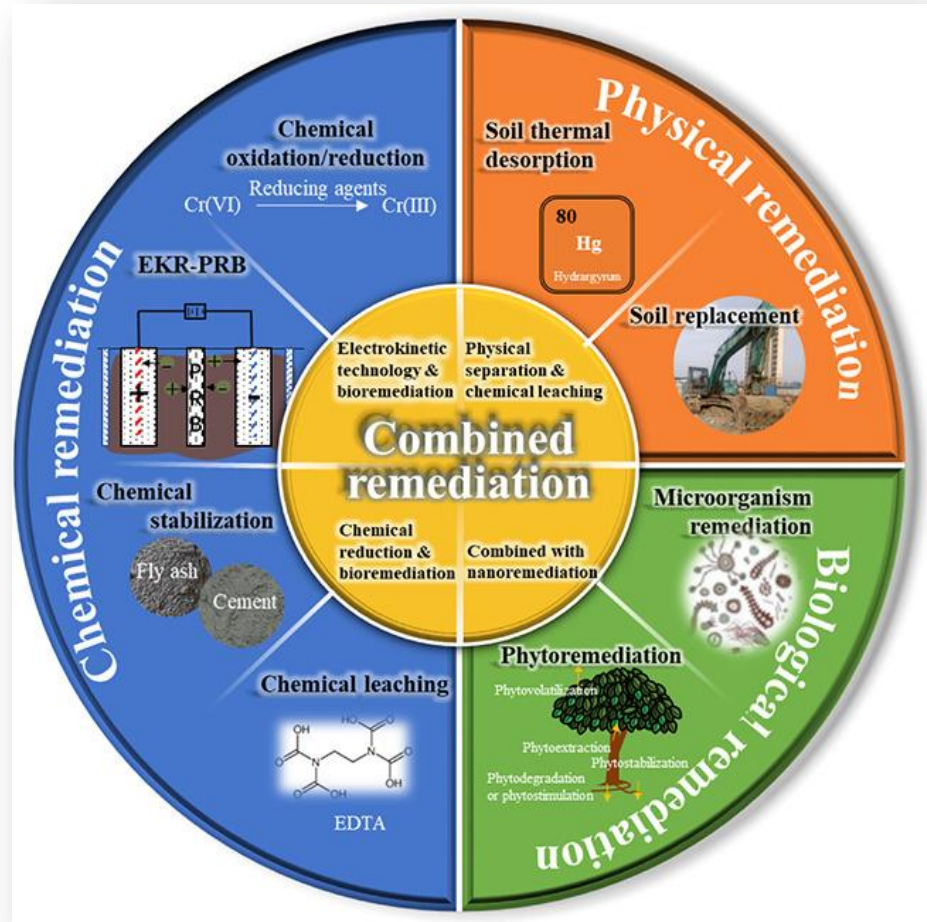


Silt



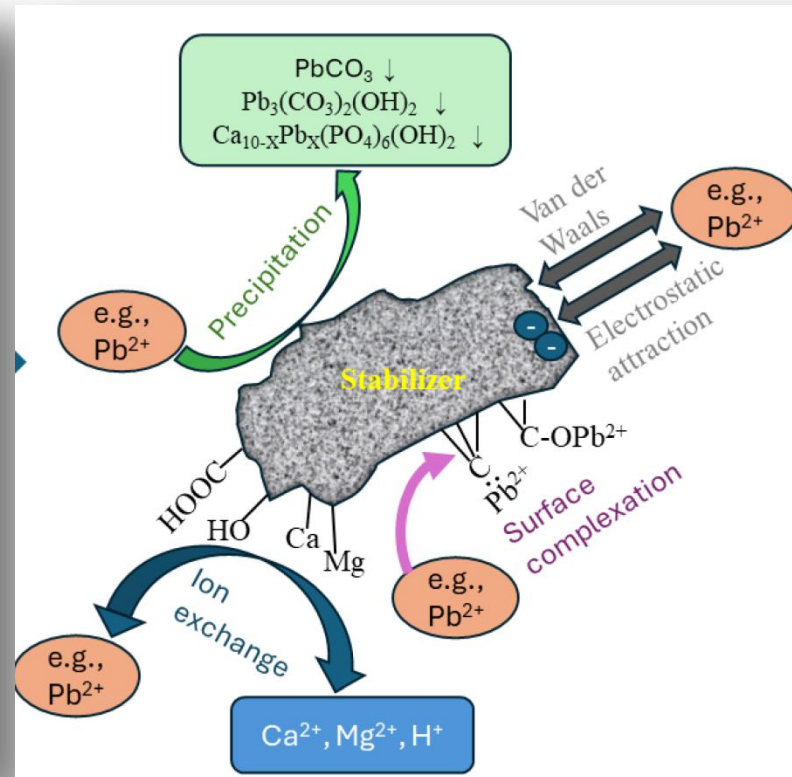
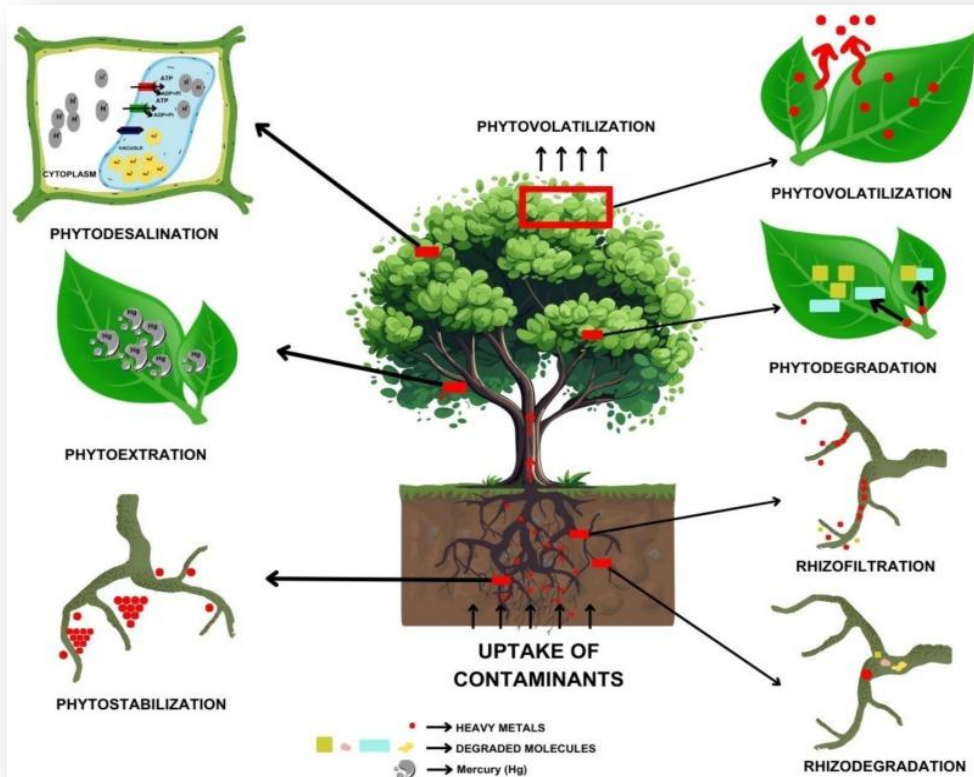
Clay

| ریسک آلودگی آب زیرزمینی | نگهداری آلاینده | حرکت آلاینده | ساختار | |
|-------------------------|-----------------|--------------|---|-------|
| بالا | کم | زیاد | ذرات درشت، زهکشی سریع، مواد آلی کم، CEC پایین | شنی |
| کم تا متوسط | زیاد | کم | ذرات بسیار ریز، CEC بالا، تخلخل کم، نفوذپذیری پایین | رسی |
| متوسط | متوسط | متوسط | ذرات متوسط، نفوذپذیری متوسط | سیلتی |
| کم تا متوسط | متعادل | متعادل | ترکیب متعادل ماسه، رس و سیلت، مواد آلی مناسب | لومی |
| کم | زیاد | کم | مواد آلی بالا، اسیدی، ظرفیت نگهداری آب زیاد | آلی |

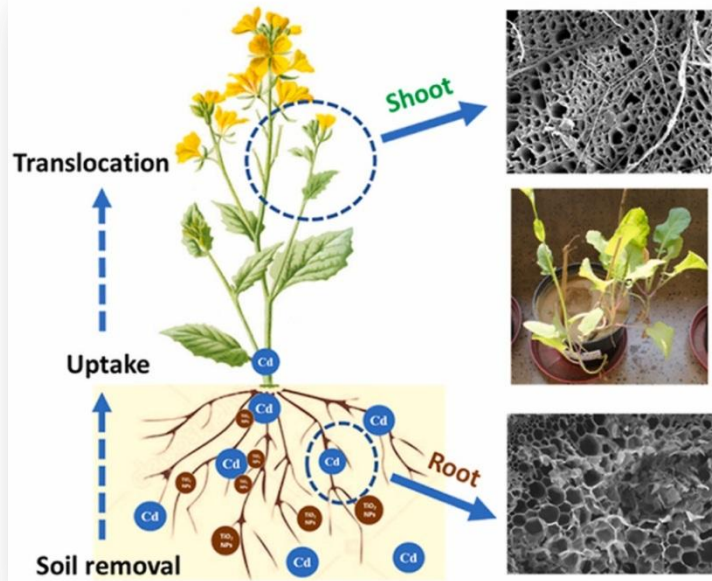


| غلظت کم / شرایط مساعد | غلظت زیاد / شرایط نامساعد | |
|--|-------------------------------------|--------------------------------|
| زیست پالایی (خاک لومی/شنی، محیط گرم) | حفاری + تیمار حرارتی (خاک کم نفوذ) | هیدروکربن های سنگین |
| SVE (Soil Vapor Extraction) برای منطقه غیراشباع، خاک شنی | | هیدروکربن های سبک |
| گیاه پالایی (غلظت کم، سطحی) | تثبیت/جامدسازی (غلظت زیاد) | فلزات سنگین |
| تثبیت شیمیایی | حفاری + تثبیت/دفن | فلزات سنگین در خاک رسی |
| زیست پالایی تقویت شده | شستشوی خاک/ حفاری + تیمار حرارتی | مواد منفجره |
| شستشو + زیست پالایی بی هوازی (خاک شنی) | حفاری + تصفیه خارج از محل (خاک رسی) | پرکلرات |
| تخریب و کاهش طبیعی | — | هیدرازین (نشت کهنه، غلظت کم) |
| حفاری فوری + اکسیداسیون شیمیایی | — | هیدرازین (نشت تازه، غلظت زیاد) |
| تثبیت شیمیایی + تخریب و کاهش طبیعی | — | هیدرازین + pH اسیدی + خاک رسی |
| حفاری فوری (خطر نفوذ به آب) | — | هیدرازین + pH قلیایی + خاک شنی |
| تصفیه ترکیبی | تصفیه ترکیبی | آلودگی مختلط |

| خاک رسی | زیاد، در عمق یا گسترده | کم و در سطح خاک |
|---------------|------------------------|-----------------|
| تثبیت شیمیایی | تثبیت/جامدسازی | گیاه پالایی |

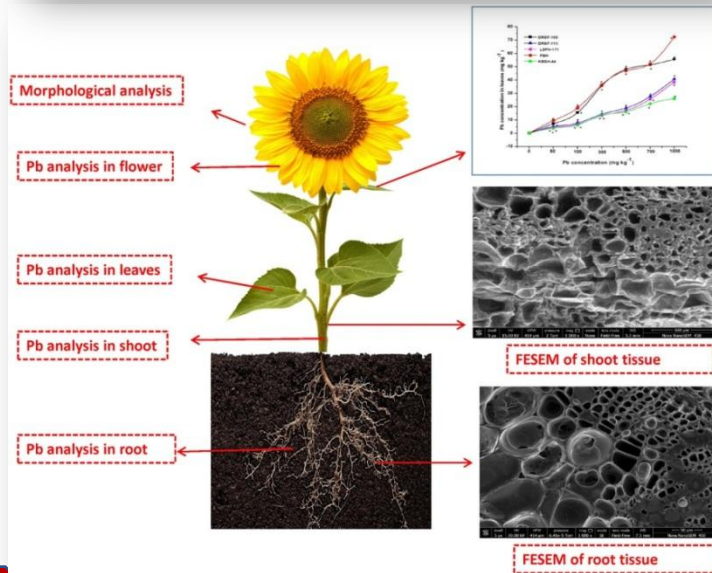


روش انجام



- ❖ کاشت گیاهان جاذب فلزات سنگین (خردل هندی، آفتابگردان، پنیرک...)
- ❖ گیاهان ریشه می‌زنند و فلزات را از خاک می‌مکنند
- ❖ وقتی گیاهان رشد کردند، برداشت می‌شوند
- ❖ گیاهانی که فلزات را جذب کرده‌اند، به عنوان زباله سمی دفن یا سوزانده می‌شوند
- ❖ این کار تکرار می‌شود تا غلظت فلز به حد مجاز برسد

مزایا و معایب



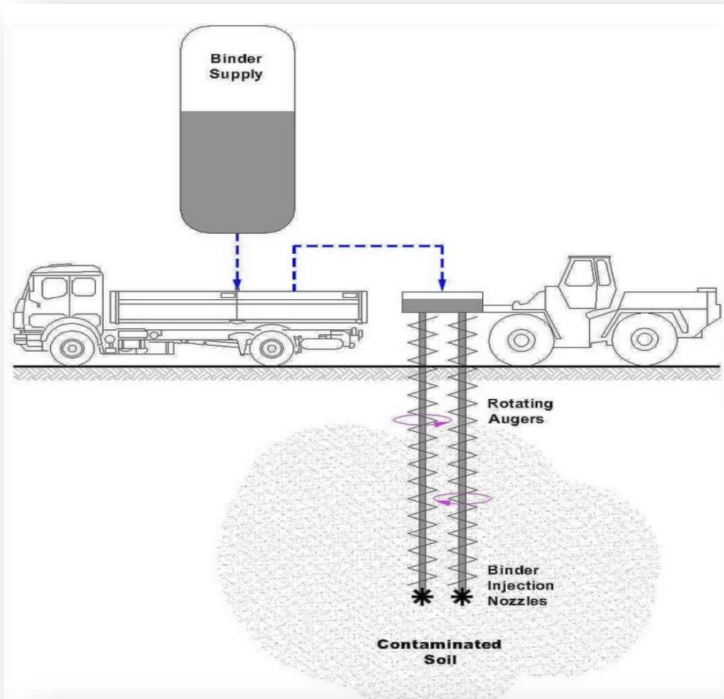
معایب

فقط برای غلظت کم و عمق کم کاربرد دارد
زمان بر (چند فصل)
فقط برای برخی فلزات مؤثر است
گیاهان آلوده باید دفع شوند

مزایا

هزینه کم
بدون حفاری
خاک زنده می‌ماند
ظاهر خوبی دارد (فضای سبز)

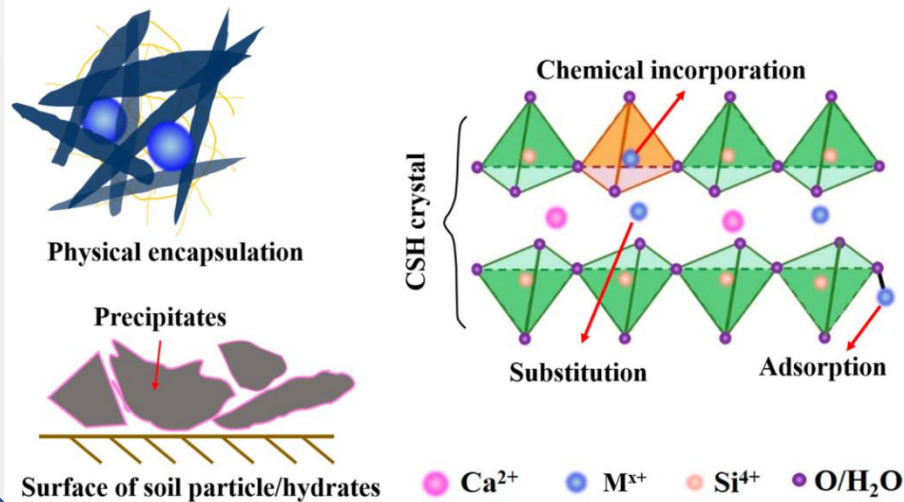
روش انجام



- به خاک سیمان، آهک، یا مواد پلیمری اضافه می شود
- مواد بایندر با فلزات واکنش می دهند و آنها را به شکل نامحلول درمی آورند
- خاک تثبیت شده را می توان در همان محل رها کرد (اگر خطر نشت نباشد) یا به محل دفن مهندسی شده انتقال داد

❖ آهک تشکیل هیدروکسیدهای نامحلول

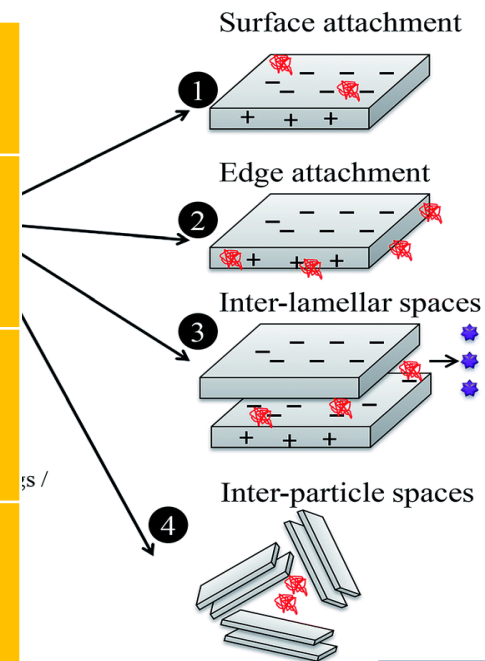
❖ سیمان با آب واکنش داده و شبکه ای از مواد کریستالی مانند سیلیکات کلسیم هیدراته ایجاد می کند.



- ✓ جذب سطحی: فلزات به سطح این ترکیبات می چسبند.
- ✓ جانشینی یونی: یون های فلز می توانند در ساختار بلوری مواد جایگزین یون هایی مانند کلسیم شوند.
- ✓ محصورسازی فیزیکی: شبکه سفت و سخت محصولات هیدراتاسیون، ذرات آلوده را در خود دفن می کند

در خاک رسی، فلزات به طور طبیعی به ذرات رس چسبیده‌اند (CEC بالا) بهترین روش این است که با مواد شیمیایی آنها را بهتر تثبیت کرد

| | |
|--|---|
| فلزات سنگین به سطح رس می‌چسبند. | جذب سطحی Adsorption |
| فلز سنگین جای یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم را روی رس می‌گیرد. | تبادل یونی Ion Exchange |
| فلز با گروه‌های شیمیایی روی سطح رس مانند OH پیوند می‌خورد. | تشکیل کمپلکس Complexation |
| فلزات به فضاهای خالی بین لایه‌های رس وارد می‌شوند و آنجا گیر می‌افتند. | جذب در لایه‌های میانی Interlayer Adsorption |

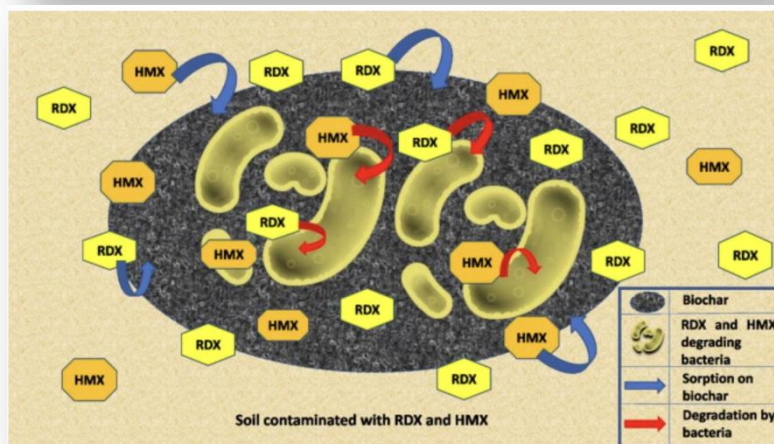


روش انجام

اگر تثبیت شیمیایی جواب ندهد

- ❖ خاک رسی آلوده را خارج می‌کنند
- ❖ خاک با سیمان مخلوط و به بلوک تبدیل می‌شود
- ❖ بلوک‌ها در محل دفن مهندسی شده (مخصوص زباله‌های سمی) دفن می‌شوند

- ❖ اضافه کردن فسفات، آهک، یا مواد آلی به خاک
- ❖ این مواد با فلزات واکنش می‌دهند و آنها را به کانی‌های نامحلول تبدیل می‌کنند
- ❖ فلزات دیگر نمی‌توانند با آب شسته شوند و به آب زیرزمینی وارد شوند
- ❖ هر چند وقت یک بار بررسی می‌شود که فلزات حرکت نکرده باشند



| غلظت کم / متوسط | غلظت بالا / نقطه داغ |
|---|------------------------------------|
| پراکنده، غلظت کم | غلظت بالا، متمرکز در یک نقطه |
| میکروب ها می توانند آلاینده را تجزیه کنند | میکروب ها در اثر سمیت، می میرند |
| زیست پالایی تقویت شده | شستشوی خاک یا حفاری + تیمار حرارتی |

شستشوی خاک یا حفاری + تیمار حرارتی

زیست پالایی تقویت شده (Enhanced Bioremediation)

❖ شستشوی خاک (Soil Washing) برای TNT

❖ حفاری + تیمار حرارتی (Thermal Desorption) برای همه مواد منفجره

❖ TNT : کمپوست سازی دو مرحله ایی (بی هوازی + هوازی)

❖ RDX و HMX : تزریق الکترون دهنده در شرایط بی هوازی

کمپوست دو مرحله‌ای (بی‌هوازی + هوازی)



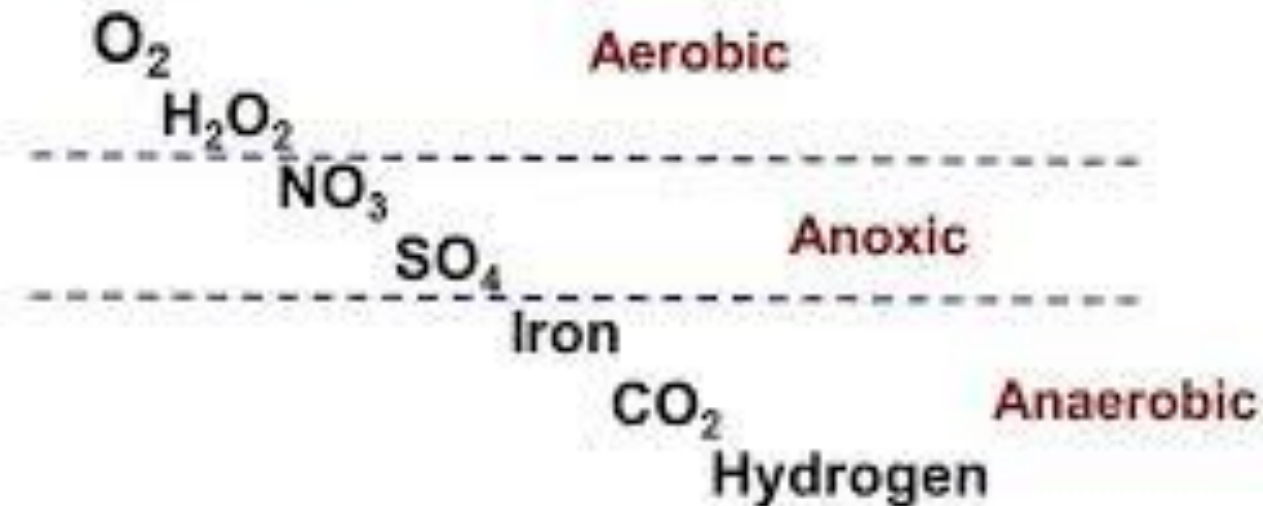
| | | |
|----------|----------|--|
| بی‌هوازی | مزوفیل | تبدیل TNT به ADNT (آمینو دی‌نیترو تولوئن) شکستن ساختار سمی |
| هوازی | گرمادوست | چسباندن ADNT به مواد آلی خاک (تثبیت نهایی) |

| TNT در خاک | چسبندگی کم | تحرک زیاد |
|---------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| پس از مرحله اول (ADNT) | واکنش‌پذیر، آماده اتصال | متوسط – هنوز متحرک است |
| پس از مرحله دوم (متصل به هوموس) | اتصال کووالانسی، غیرقابل برگشت | بسیار کم – تثبیت شده |

روش انجام

The Electron Tower:

Bacteria go for the electron acceptor that yields the highest energy, and then move down the tower when they are depleted:



❖ شناسایی آلودگی، نمونه‌برداری اولیه، آماده‌سازی خاک، ایجاد شرایط بی‌هوازی

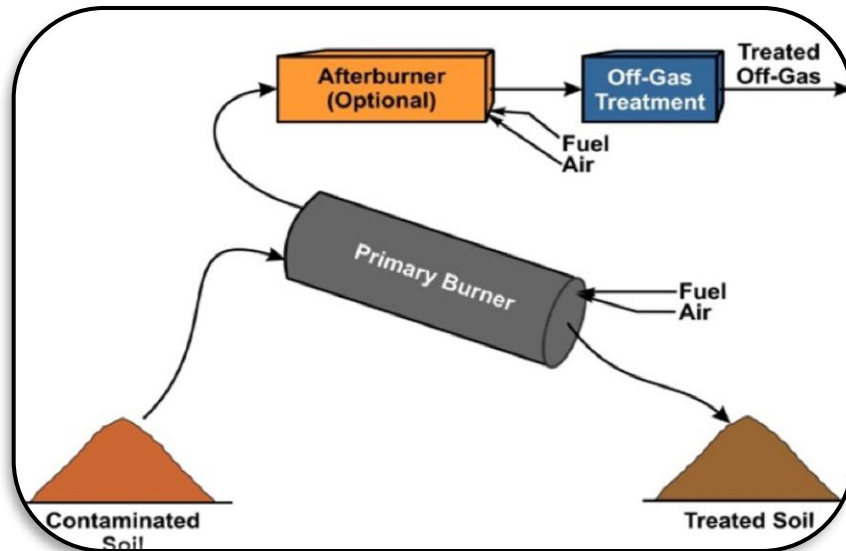
❖ انتخاب و تزریق الکترون دهنده، افزودن مواد مغذی و اینوکولوم، تنظیم رطوبت و دما

❖ نمونه‌برداری دوره‌ای، تزریق مجدد در صورت نیاز

- ❖ میکروب‌ها در غلظت بالا می‌میرند
- ❖ نقطه داغ معمولاً مساحت کمی دارد، حفاری زیاد پرهزینه نیست

حفاری + تیمار حرارتی (Thermal Desorption) برای همه مواد منفجره

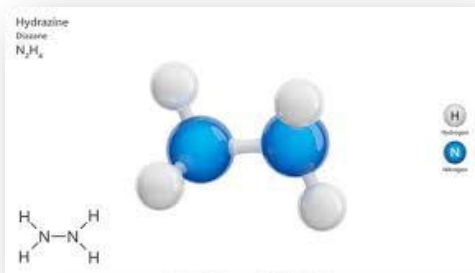
- ❖ خاک آلوده از زمین خارج می‌شود
- ❖ خاک حرارت داده می‌شود
- ❖ مواد منفجره تبخیر یا تجزیه می‌شوند
- ❖ گازهای خروجی (حاوی آلاینده) تصفیه می‌شود
- ❖ خاک تصفیه شده بر گردانده می‌شود



شستشوی خاک (Soil Washing) برای TNT

- ❖ خاک آلوده از زمین خارج می‌شود
- ❖ خاک با آب و مواد شوینده مخصوص مخلوط می‌شود تا TNT از خاک جدا شود
- ❖ آب حاوی TNT از خاک جدا می‌شود
- ❖ آب جدا شده تصفیه می‌شود (با کربن فعال یا تیمار حرارتی...)
- ❖ خاک تصفیه شده بازگردانده می‌شود





❖ هیدرازین در pH اسیدی به ذرات خاک می چسبد و حرکت نمی کند. در حالی که در pH قلیایی (بالای ۸) به راحتی در خاک حرکت می کند و به آب زیرزمینی می رسد.

❖ هیدرازین خودبه خود تجزیه می شود

هیدرازین (نشت کهنه، غلظت کم)

❖ تخریب و کاهش طبیعی

هیدرازین + pH اسیدی + خاک رسی

❖ تثبیت شیمیایی + تخریب و کاهش طبیعی

هیدرازین (نشت تازه، غلظت زیاد)

❖ حفاری فوری + اکسیداسیون شیمیایی

✓ پرسولفات $S_2O_8^{2-}$

✓ فنتون ($Fe^{2+} + H_2O_2$)

✓ پرمنگنات پتاسیم ($KMnO_4$)

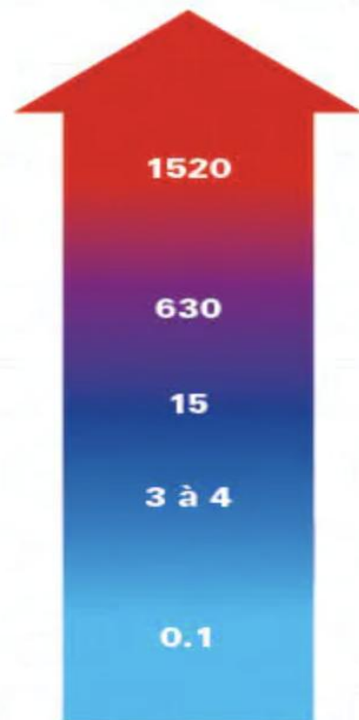
✓ ازن، پراکسید هیدروژن

هیدرازین + pH قلیایی + خاک شنی

❖ حفاری فوری + اکسیداسیون شیمیایی

Effects of hydrazine (N_2H_4) on health

Hydrazine concentration
(expressed in ppm)



Effects on human health

▶ Threshold of first significant lethal effects after 30 minutes exposure

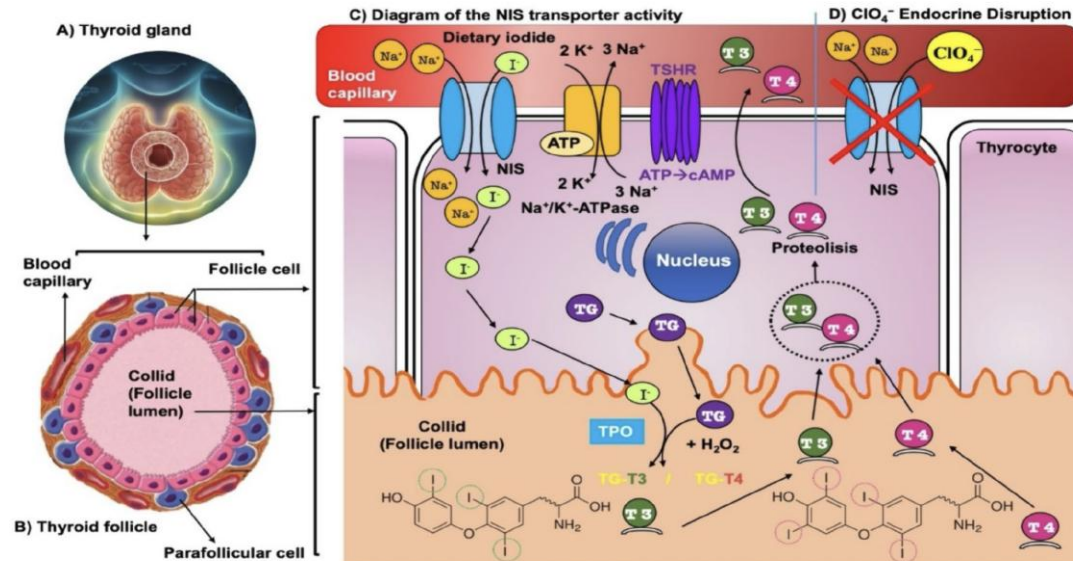
▶ First lethal effects threshold after 60 minutes exposure

▶ Reversible effects threshold after 60 minutes exposure

▶ Olfactory threshold. Below these values, hydrazine is not detectable through smell

▶ Time-weighted average values and occupational exposure limits

❖ پرکلرات (ClO_4^-) یک آلاینده بسیار محلول، متحرک و پایدار است و رفتار آن در محیط به بافت خاک بستگی دارد



خاک شنی

حرکت کندتر، اما باز هم نهایتاً به آب زیرزمینی می‌رسد

خيلي سريع با آب شسته می‌شود و به عمق می‌رود

آلودگی سریع آب زیرزمینی

شستشو + زیست‌پالایی بی‌هوازی (در محل)

خاک رسی

آلودگی آب زیرزمینی (با تاخیر)

حفاری + تصفیه خارج محل

حفاری + تصفیه خارج از محل

خاک رسی آلوده را پس از کندن از زمین خارج می‌کنند خاک را به واحد تصفیه می‌برند خاک را با آب شسته شده تا پرکلرات از آن خارج شود. آب را با روش‌های زیست‌پالایی بی‌هوازی یا تبادل یونی تصفیه می‌شود خاک تمیز شده به جای خود برگردانده می‌شود

شستشو + زیست‌پالایی بی‌هوازی (در محل)

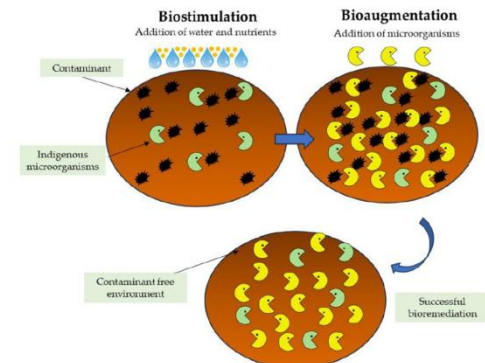
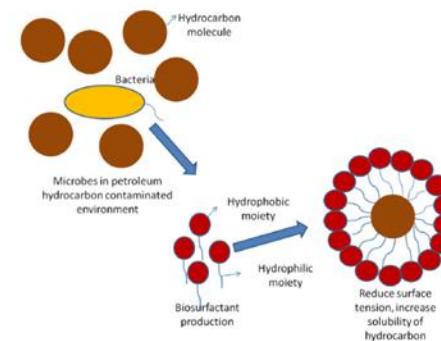
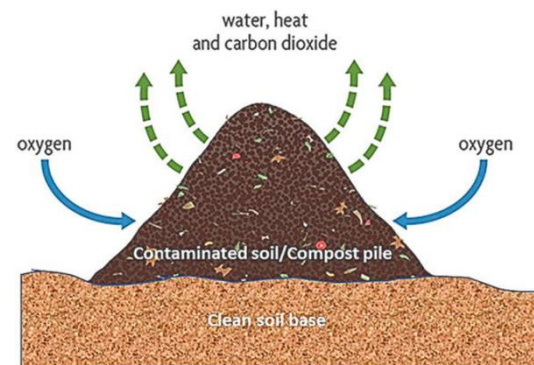
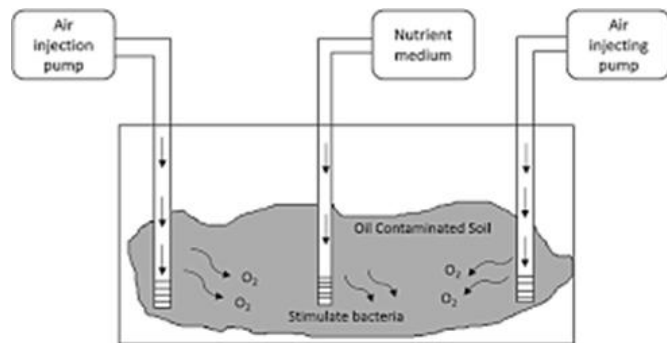
آب (گاهی با مواد افزودنی) از خاک عبور داده شده و پرکلرات را با خود حمل می‌کند آب حاوی پرکلرات جمع‌آوری می‌شود آب آلوده به راکتور (یا همان منطقه زیرزمینی) هدایت می‌شود. در نبود اکسیژن، باکتری‌ها پرکلرات را به کلرید بی‌خطر تبدیل می‌کنند

روش اصلی: زیست پالایی هوازی (Aerobic Bioremediation)

محدودیت ها

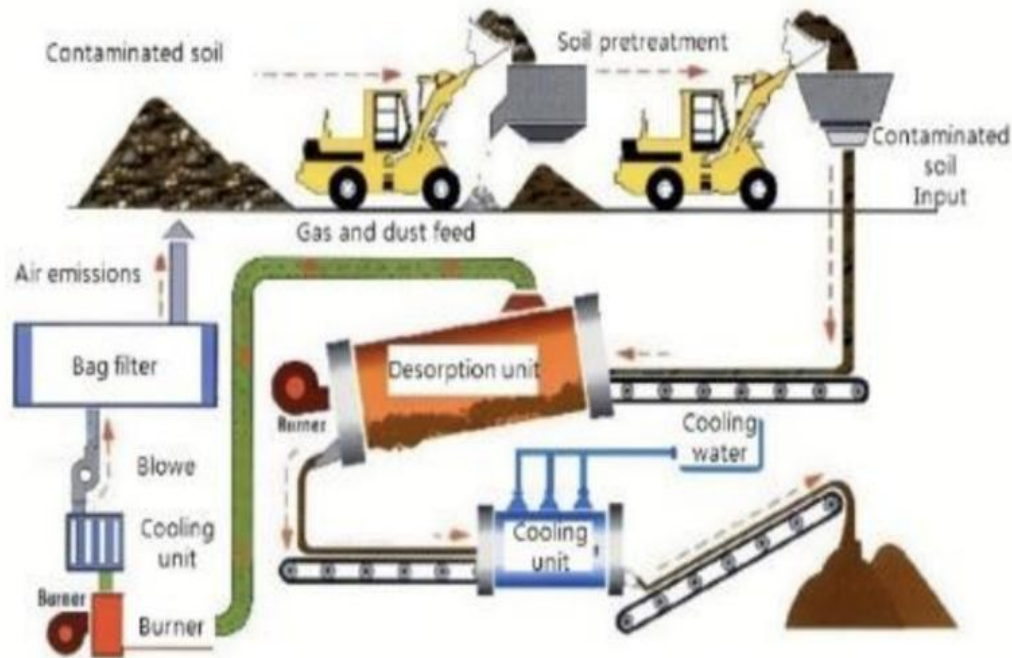
- ❖ نسبتاً زمانبر است
- ❖ در دمای زیر ۱۰ درجه، سرعت خیلی کم می شود
- ❖ در خاک رسی راندمان پایین است
- ❖ در غلظت بالای آلاینده، میکروب ها رشد نمی کنند

| کاربرد | توضیح | روش |
|------------------------------------|---|-------------------------------|
| همه هیدروکربن ها، غلظت کم تا متوسط | تزریق آرام هوا به خاک | بیوهوادمی (Bioventing) |
| غلظت متوسط | مخلوط کردن خاک آلوده با کاه، کود، خاک اره | کمپوست سازی (Composting) |
| هیدروکربن های سنگین و چسبنده | استفاده از این مواد موجب جداسازی هیدروکربن ها از خاک می شود | افزودن بیوسورفکتانت |
| خاکی که میکروب بومی ضعیفی دارد | میکروب های مخصوص به خاک اضافه می شود | بیواگمنتیشن (Bioaugmentation) |



دلیل انتخاب

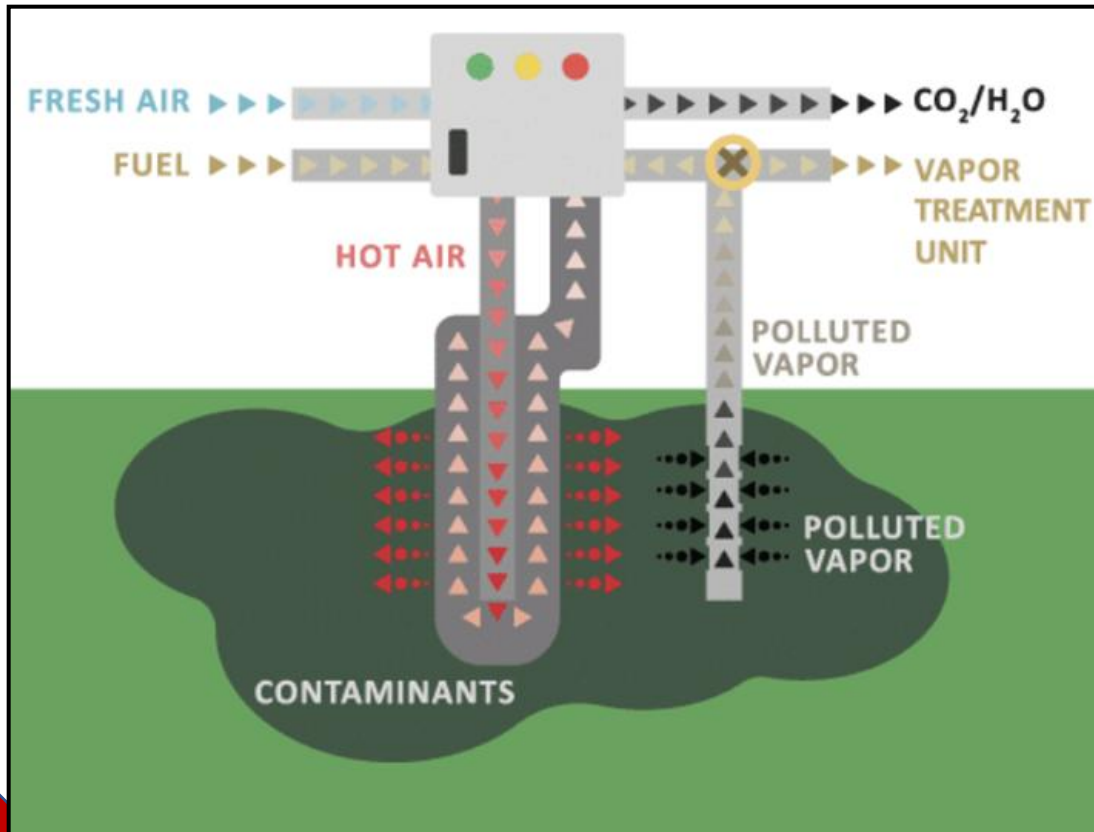
❖ استفاده از روش‌های زیستی در مناطقی با خاک رسی به دلیل نفوذپذیری بسیار پایین و چسبندگی آلاینده به ذرات رس کارایی لازم را ندارند



| | |
|---|--|
| خاک رسی آلوده کنده و خارج می شود | حفاری (Excavation) |
| خاک الک، خرد و یک دست می شود | پیش پردازش (Pre-treatment) |
| خاک آماده شده وارد دستگاه واجذب حرارتی می شود | تغذیه به کوره (Feeding) |
| خاک حرارت داده می شود | گرمایش (Heating) |
| هیدروکربن‌های سنگین تبخیر می‌شوند و از خاک جدا می‌گردند | تبخیر آلاینده (Desorption) |
| بخارات خارج شده سوزانده (اکسیداسیون حرارتی) و یا با کربن فعال تصفیه می‌شوند | تصفیه گازها (Off-gas Treatment) |
| خاک تمیز و داغ خنک شده و به جای خود برمی‌گردانده می‌شود | خنک‌سازی و بازگشت خاک (Cooling & Backfill) |

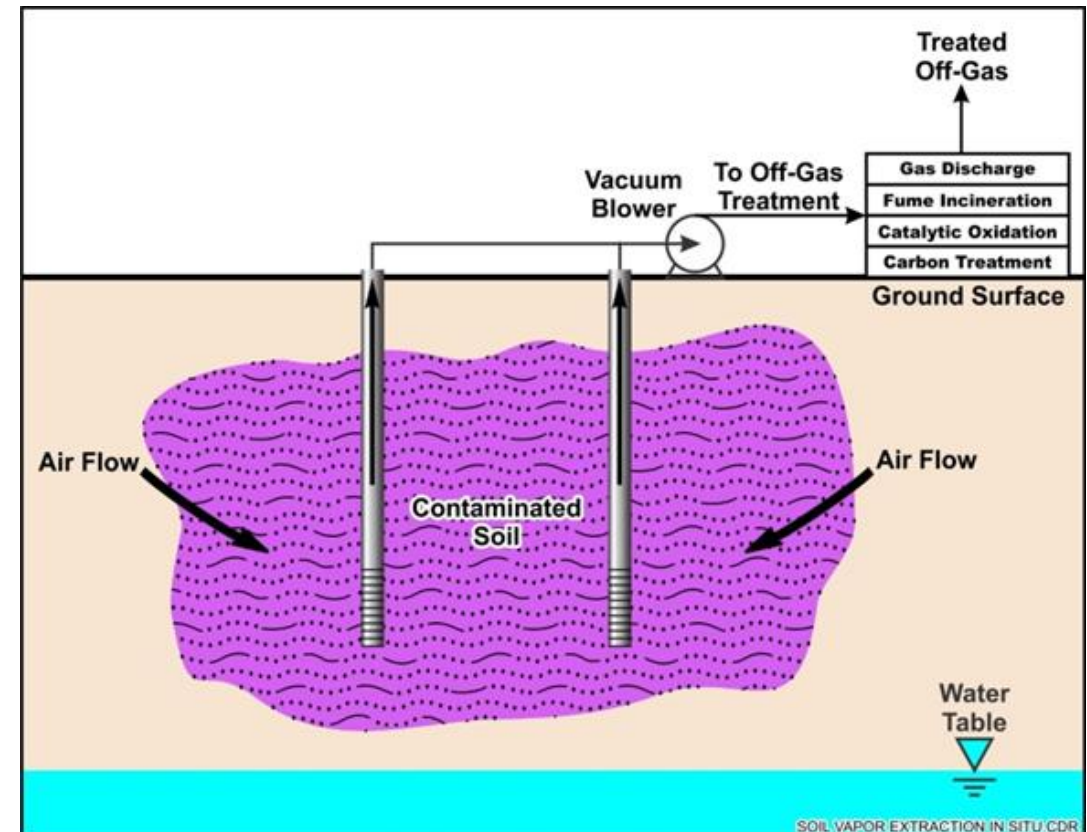
تیمار حرارتی درجا In-Situ Thermal Desorption

- ❖ برای خاک رسی با غلظت بالا، روش های معمول به دلیل نفوذپذیری بسیار پایین خاک رسی عملاً کارایی ندارند.
- ❖ روش جایگزین: حفاری + تیمار حرارتی

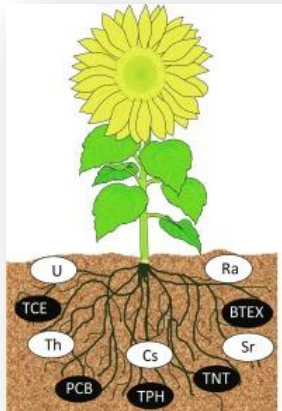


Soil Vapor Extraction (SVE)

- ❖ در منطقه غیراشباع و خاک شنی، یکی از مؤثرترین، کم هزینه ترین و رایج ترین روش های پالایش خاک های آلوده به هیدروکربن های فرار و حلال های صنعتی است.

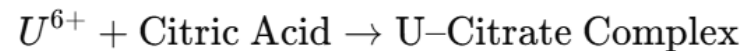


| روش | مکانیسم اصلی | بهترین شرایط کاربرد | کارایی | مزایا | معایب |
|---------------------------------------|---|---|--------------|--|--|
| گیاه‌پالایی | جذب اورانیوم توسط ریشه گیاهان و انتقال به اندام‌های هوایی | غلظت کم تا متوسط، خاک سطحی، خاک شنی تا لومی | متوسط تا خوب | هزینه کم، غیرمخرب، مناسب برای مناطق وسیع | زمان‌بر، محدود به محدوده دسترسی ریشه، نیاز به دفع گیاهان آلوده |
| شستشوی خاک با اسید یا کربنات | انحلال شیمیایی اورانیوم با اسید (مثل اسید سولفوریک/سیتریک) یا کربنات‌ها | غلظت کم تا زیاد، خاک شنی | بالا | سریع، کارایی بالا در شرایط بهینه | تولید پساب، تخریب خاک، هزینه مواد شیمیایی |
| حفاری + تثبیت/جامدسازی | حفاری خاک و مخلوط با مواد بایندر (سیمان، آهک، قیر) برای کاهش تحرک | غلظت زیاد، خاک رسی، آلودگی عمیق، اورانیوم به صورت ذرات جامد | بسیار بالا | قطعی، مناسب برای هر نوع خاک، مدیریت متمرکز | بسیار پرهزینه، تخریب کامل سایت، نیاز به دفن بلوک‌های تثبیت شده |
| خنثی‌سازی با آهک + سپس شستشو یا تثبیت | حلالیت اورانیوم | خاک اسیدی، خاک‌های با تحرک بالای اورانیوم | محدود | کاهش تحرک | اثر کوتاه‌مدت - در pH قلیایی بالا، اورانیوم دوباره حل می‌شود |



شستشوی خاک با اسید (Chemical Extraction)

اسید سیتریک به عنوان یک شلات کننده طبیعی عمل کرده و اورانیوم را از سطح ذرات جدا می کند
اسید سیتریک به سطح ذرات خاک نفوذ می کند با اورانیوم و سایر فلزات پیوند تشکیل می دهد این پیوند باعث جدا شدن فلز از سطح خاک می شود کمپلکس محلول تشکیل شده و وارد فاز آبی می شود



گیاهپالایی (Phytoremediation)

گیاهان اورانیوم را عمدتاً از طریق ریشه جذب می کنند. اورانیوم در ریشه تجمع می یابد و مقدار کمی به اندام های هوایی منتقل می شود

شستشوی خاک با کربنات (Chemical Extraction)

شوینده های کربناته (بی کربنات آمونیوم) با اورانیوم کمپلکس محلول کربنات-اورانیل تشکیل می دهند
انتخابی بودن: عمدتاً اورانیوم را بدون حل کردن زیاد سایر فلزات استخراج می کند.
بازیافت آمونیوم: بی کربنات آمونیوم فرار است و با حرارت دادن محلول استخراجی، آمونیاک و CO_2 خارج شده و کمپلکس شکسته می شود و اورانیوم به صورت رسوب بازیافت می گردد.
محدودیت: در خاک های اسیدی مؤثر نیست (در pH پایین، کربنات به CO_2 تبدیل و خارج می شود).
$$UO_2^{2+} + 3CO_3^{2-} \rightarrow [UO_2(CO_3)_3]^{4-}$$

خنثی سازی با آهک + شستشو یا تثبیت

❖ افزودن آهک به خاک اسیدی برای افزایش pH

✓ در pH بالا (حدود ۸-۹)، حلالیت بسیاری از فلزات سنگین کاهش می یابد

✓ در pH بسیار بالا (بیش از ۱۰)، کمپلکس های کربنات-اورانیل محلول تشکیل می شوند و اورانیوم دوباره وارد فاز آبی می گردد.

موارد استفاده

✓ خاک های اسیدی با تحرک بالای اورانیوم (به عنوان مرحله پیش پردازش)
✓ تثبیت موقت قبل از حفاری

➤ روش جایگزین:

استفاده از باکتری های کاهنده سولفات که در محیط قلیایی نیز اورانیوم را به UO_2 نامحلول تبدیل می کنند.

حفاری + تثبیت / جامدسازی

❖ حفاری: خاک آلوده به طور کامل از محل خارج می شود

❖ تثبیت شیمیایی: سیمان، آهک...

❖ محصورسازی فیزیکی: قیر، ترکیباب پلیمری

✓ سیمان

افزایش pH، جذب سطحی، حبس فیزیکی

✓ آهک

در pH بالا حلالیت اورانیوم کاهش می یابد
 $UO_2(OH)_2 \downarrow$

✓ فسفات

فسفات ها یکی از مؤثرترین مواد برای تثبیت بلندمدت اورانیوم هستند.
تشکیل کانی های بسیار پایدار



✓ قیر

برخلاف سیمان یا فسفات، قیر واکنش شیمیایی قوی با اورانیوم ندارد
(محصورسازی فیزیکی)

- ❖ هرچه عدد PS بزرگ تر باشد ، آلاینده اولویت بالاتری برای حذف دارد.
- ❖ PS بر اساس غلظت، تحرک، سمیت، ریسک آب، انتشار، ماندگاری و ... محاسبه می شود.

$$PS = 0.05(\text{ماندگاری}) + 0.10(\text{انتشار}) + 0.15(\text{ریسک آب}) + 0.20(\text{سمیت}) + 0.20(\text{تحرک}) + 0.30(\text{غلظت})$$

| غلظت آلاینده آلاینده | ۱ (کم) | ۲ (متوسط) | ۳ (زیاد) | ۴ (بحرانی) |
|----------------------|--------|-----------|----------|------------|
| TNT | | | | |
| Pb | | | | |
| پرکلرات | | | | |
| | | | | |

این روش باعث می شود تصمیم گیری فقط بر اساس غلظت نباشد بلکه رفتار واقعی آلاینده در محیط هم در نظر گرفته شود

- ✓ تحرک
 - ۱ حرکت کم / نفوذ محدود
 - ۲ حرکت محدود
 - ۳ حرکت قابل توجه
 - ۴ حرکت سریع، مهاجرت زیاد
- ✓ سمیت
 - ۱ کم خطر
 - ۲ متوسط
 - ۳ زیاد
 - ۴ بسیار سمی / انفجاری
- ✓ ریسک نفوذ به آب زیرزمینی
 - ۱ احتمال نفوذ کم
 - ۲ احتمال نفوذ متوسط کم
 - ۳ احتمال نفوذ زیاد
 - ۴ احتمال نفوذ بسیار زیاد
- ✓ انتشار
 - ۱ پراکندگی محدود
 - ۲ پراکندگی کم
 - ۳ پراکندگی زیاد
 - ۴ پراکندگی سریع
- ✓ ماندگاری
 - ۱ سریع تجزیه
 - ۲ نیمه پایدار
 - ۳ پایدار
 - ۴ بسیار پایدار

فرض کنید در خاک یک منطقه آلوده TNT، Pb و پرکلرات اندازه گیری شده است

$$PS(TNT) = 0.30(3) + 0.20(2) + 0.20(4) + 0.15(3) + 0.10(3) + 0.05(3)$$

$$PS = 0.9 + 0.4 + 0.8 + 0.45 + 0.3 + 0.15$$

$$PS = 3.0$$

$$PS(Pb) = 0.30(3) + 0.20(1) + 0.20(3) + 0.15(2) + 0.10(2) + 0.05(4)$$

$$PS = 0.9 + 0.2 + 0.6 + 0.3 + 0.2 + 0.2$$

$$PS = 2.4$$

$$PS(Perchlorate) = 0.30(2) + 0.20(4) + 0.20(3) + 0.15(4) + 0.10(4) + 0.05(3)$$

$$PS = 0.6 + 0.8 + 0.6 + 0.6 + 0.4 + 0.15$$

$$PS = 3.15$$

| غلظت اندازه گیری شده | آلاینده |
|----------------------|-------------|
| 300 mg/kg | TNT |
| 500 mg/kg | Pb |
| 100 mg/kg | Perchlorate |

| | (mg/kg) TNT | | (mg/kg) Pb | | پرکلرات (mg/kg) |
|---|-------------|---|------------|---|-----------------|
| 1 | 0-50 | 1 | 0-100 | 1 | 0-50 |
| 2 | 51-200 | 2 | 101-400 | 2 | 51-150 |
| 3 | 201-1000 | 3 | 401-1000 | 3 | 151-500 |
| 4 | >1000 | 4 | >1000 | 4 | >500 |

| اولویت | PS | آلاینده |
|--------|------|-------------|
| اول | 3.15 | Perchlorate |
| دوم | 3.00 | TNT |
| سوم | 2.40 | Pb |

تعیین سایر امتیازها

| آلاینده | تحرک | سمیت | ریسک آب | انتشار | ماندگاری |
|-------------|------|------|---------|--------|----------|
| TNT | 2 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| Pb | 1 | 3 | 2 | 2 | 4 |
| Perchlorate | 4 | 3 | 4 | 4 | 3 |



با تشکر از توجه شما